

Predicción estacional: evolución y nuevas perspectivas (I)

E. RODRÍGUEZ CAMINO, METEORÓLOGO DEL ESTADO Y E. RODRÍGUEZ GUIASO, AEMET

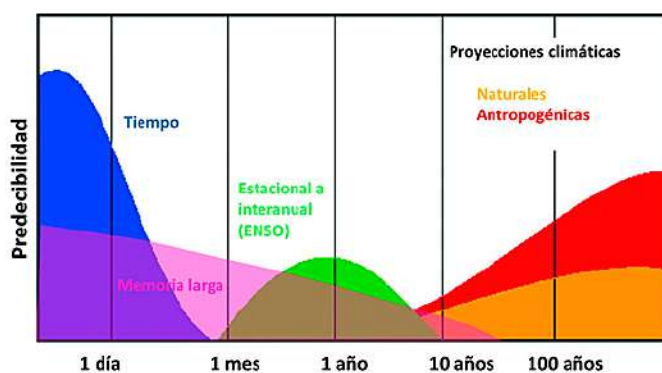
1 Introducción

Los avances en los sistemas de observación, las mejoras en la comprensión y modelización de los distintos componentes del sistema terrestre y el aumento de las capacidades de cálculo han permitido en los últimos cuarenta años un continuo avance tanto en la predicción meteorológica como la climática por parte de los principales centros operativos de todo el mundo. La primera generación de sistemas dinámicos de predicción estacional se puso en operación a mediados de la década de 1990 tanto en EE.UU. por el *National Meteorological Service* como en Europa por el *European Centre for Weather Medium-Range Forecasts*. Estos sistemas constituyeron el germen de la sólida infraestructura de predicción estacional operativa que ha creado la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y otras iniciativas tales como el *Copernicus Climate Change Service (C3S)*, el *International Research Institute (IRI) for Climate and Society*, etc.

El desarrollo de las predicciones estacionales y la infraestructura asociada apunta a satisfacer la necesidad de información predictiva por parte de los usuarios en escalas de tiempo estacionales que pueda utilizarse para la toma de decisiones en sectores tales como la agricultura y la seguridad alimentaria, la salud, la energía, la gestión del agua, la asignación de recursos y el riesgo de catástrofes, etc. La información anticipada sobre las condiciones climáticas de las próximas estaciones permite a los usuarios minimizar los riesgos asociados a las condiciones climáticas adversas y maximizar los beneficios de las condiciones climáticas favorables.

En general se consideran cuatro fuentes de predecibilidad en el sistema climático: i) el conocimiento del estado inicial del sistema que es la fuente predominante en la predicción del tiempo; ii) el conocimiento de las condiciones de contorno del

sistema y que pueden ser naturales (p.ej., grandes erupciones volcánicas) o antropogénicas (p.ej., aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero); iii) el conocimiento de los patrones de variabilidad (p.ej., ENSO); iv) el conocimiento de variables con memoria a largo plazo (p.ej., temperatura de los océanos, humedad del suelo, cobertura de nieve, etc.). Estas fuentes de predecibilidad permiten diseñar sistemas de predicción estacional tanto empíricos como dinámicos que las incorporan implícitamente. El esquema adjunto muestra las fuentes mencionadas



Fuentes de predecibilidad en el sistema climático.

Fuente: modificación sobre esquema original de K. Trenberth, NCAR.

y su importancia relativa en función de la escala temporal.

Sin embargo, la actual infraestructura operativa para las predicciones estacionales, a pesar de ser muy completa y compleja, se encuentra con serios impedimentos para su utilización por parte de los usuarios finales. En primer lugar, por la limitada pericia que tienen los sistemas de predicción estacional, consecuencia de su poca predecibilidad, sobre las latitudes medias y en la fachada euroatlántica en particular. En segundo lugar, porque la toma de decisiones a nivel local requiere información espacial en alta resolución mientras que los sistemas de predicción estacional globales actualmente disponibles no proporcionan esta necesaria alta resolución. En tercer lugar, porque las salidas directas de los modelos globales deben ser corregidas por sesgos, calibradas

y convenientemente combinadas para poder proporcionar información útil a los usuarios. Finalmente, porque las salidas de los modelos deben integrarse en servicios climáticos específicos que permitan estimar la evolución a escala estacional de las variables relevantes para los diferentes tipos de usuarios y no solo la evolución de las variables climáticas como temperatura, precipitación, viento, etc.

2 Evolución histórica

Las precipitaciones asociadas a los monzones son fenómenos estacionales cuya variabilidad en la India y el sudeste asiático afecta a muchos millones de personas. De hecho, la devastadora hambruna que asoló la región a finales de la década de 1870 estimuló el desarrollo de la primera predicción estacional operativa en 1886 -realizada por Henry Francis Blanford, primer jefe del Departamento Meteorológico de la India- de la precipitación asociada al monzón de verano para la región que abarca toda la India y Birmania. La predicción se basaba en un método empírico que asociaba la extensión y el espesor variables de la nieve del Himalaya con las condiciones climáticas de las llanuras del noroeste de la India. Sir John Eliot, que sucedió a Blanford al frente del Departamento Meteorológico en 1895, aplicó métodos de análogos para la previsión estacional de las lluvias monzónicas de verano en la India.

Los esfuerzos por mejorar las predicciones estacionales continuaron con el siguiente director del Departamento Meteorológico de la India, Sir Gilbert T. Walker (1904-1924) que inició estudios sistemáticos para desarrollar técnicas objetivas de previsión estacional y también realizó estudios de las variaciones mundiales de parámetros meteorológicos, tales como precipitación, temperatura, presión, etc. La búsqueda de posibles predictores llevó a Walker a identificar

los esfuerzos por mejorar las predicciones estacionales continuaron con el siguiente director del Departamento Meteorológico de la India, Sir Gilbert T. Walker (1904-1924) que inició estudios sistemáticos para desarrollar técnicas objetivas de previsión estacional y también realizó estudios de las variaciones mundiales de parámetros meteorológicos, tales como precipitación, temperatura, presión, etc. La búsqueda de posibles predictores llevó a Walker a identificar

tres patrones de fluctuación a gran escala de la presión: la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación del Pacífico Norte (NPO) y la Oscilación del Sur (SO). Walker también introdujo el concepto de correlación y regresión por primera vez en la previsión estacional para eliminar la subjetividad de las técnicas anteriores. La primera previsión objetiva oficial se emitió en 1909 para la precipitación estacional del monzón en toda la India, basada en la técnica de regresión. Walker realizó un trabajo pionero sobre la SO y publicó una técnica de predicción para la precipitación de los monzones en la India que contenía 22 predictores.

La SO, definida como la diferencia en la presión a nivel del mar entre Tahití y Darwin, se relacionó posteriormente con el calentamiento inusual de las aguas superficiales del Océano Pacífico tropical oriental, o El Niño, por Jacob Bjerknes en la década de 1960. Bjerknes, y posteriormente otros definieron estos fenómenos océano-atmósfera vinculados como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

Los episodios de El Niño de 1972/1973 y La Niña de 1973/1974 permitieron observar que las fases opuestas de ENSO



Sir Gilbert T. Walker (1868 - 1958).

Fuente: Wikipedia

tienen impactos significativos, y generalmente opuestos, en los patrones de temperatura y precipitación en todo el mundo y que estos impactos son más pronunciados en las regiones tropicales. El episodio de El Niño de 1982/1983 y

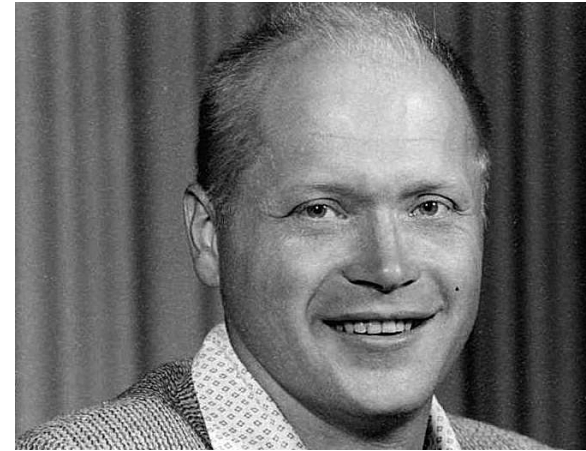
sus anomalías climáticas regionales asociadas permitieron que se reconociera al fenómeno acoplado océano-atmósfera de ENSO como el modo dominante de la variabilidad climática interanual de la Tierra. Estas observaciones, también respaldadas por estudios teóricos, sugerían que la capacidad de predicción en escalas de tiempo estacionales está relacionada con las condiciones de contorno del sistema climático que evolucionan lentamente, tales como la temperatura de la superficie del mar, la cobertura de la nieve, la humedad del suelo, la extensión del hielo marino, etc. La identificación de teleconexiones climáticas globales estadísticamente significativas asociadas al ENSO ha dado lugar a que los parámetros relacionados con ENSO, junto con otros impulsores del clima que varían lentamente, se utilicen como predictores en modelos de previsión empíricos/estadísticos para anomalías de temperatura y precipitación en superficie a gran escala. Los modelos estadísticos también han proporcionado una referencia para evaluar la habilidad de los modelos dinámicos de circulación general de última generación, ahora comúnmente utilizados, para predicción climática estacional.

3 Modelos numéricos

Los primeros pasos hacia la previsión climática estacional basada en modelos dinámicos fueron dados en 1956 por Norman Phillips que había sido reclutado por Von Neumann para trabajar en el Instituto de Estudios Avanzados (Princeton, EE.UU.) con el ordenador ENIAC. Phillips desarrolló un modelo baroclínico de dos niveles para simular patrones mensuales y estacionales de la circulación troposférica inaugurando una nueva era en la ciencia climática ya que por primera vez se pudo deducir el clima de la Tierra a partir de un modelo numérico.

Unos años después (1963), Cecil Leith desarrolló un modelo completo para la simulación atmosférica que incluía múltiples niveles que abarcaban la troposfera y la estratosfera inferior además de una representación del ciclo hidrológico y de las nubes y que puede considerarse como el primer modelo de circulación general atmosférico en el sentido actual del término. Posteriormente otros grupos de investigación se esforzaron por seguir desarrollando modelos de cir-

culación general. Zebiak y Cane (1987) predijeron por primera vez la variabilidad de ENSO con un modelo dinámico simple de océano-atmósfera acoplado. El establecimiento del programa internacional sobre los Océanos Tropicales y la



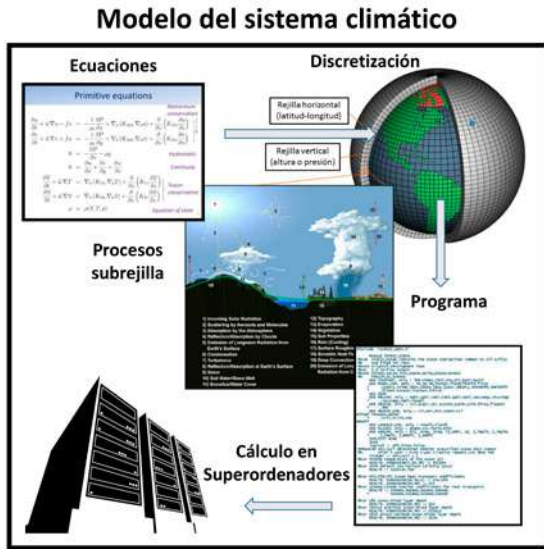
Norman Phillips (1923 - 2019).

Fuente: MIT Museum

Atmósfera Global (TOGA) que duró diez años (1985-1994) y la implantación de un sistema de observación del océano en el Pacífico ecuatorial, condujeron al desarrollo de los actuales y sofisticados sistemas operativos de predicción estacional. La capacidad de predicción de los modelos dinámicos ha mejorado notablemente durante las últimas décadas, principalmente debido a los avances en la estimación de las condiciones oceánicas y atmosféricas iniciales, así como a los avances en la física de los modelos y en la capacidad de cálculo. El carácter caótico del sistema climático por el que una pequeña incertidumbre en la condición inicial puede conducir a cambios sustanciales en la predicción estacional y la necesidad de comunicar la incertidumbre en la predicción más allá del alcance determinista -de aproximadamente una semana- dio lugar a la introducción de los enfoques probabilísticos y de los métodos de predicción por conjuntos tanto para la predicción meteorológica como climática (y estacional en particular).

Los modelos globales distan todavía mucho de reproducir todas las características atmosféricas, en particular cuando se realizan predicciones extendidas a escala estacional -o más largas- con ellos se observa que, una vez sobrepasado el alcance determinista (1-2 semanas), la evolución de los diferentes miembros de un

Predicción estacional: evolución y nuevas perspectivas (I)



Sistema climático real



Esquema de los modelos climáticos

ensemble generado con un mismo modelo no se ajustan a la climatología observada sino que muestran una deriva patente: las simulaciones extendidas con modelos globales tienden a definir una climatología propia de cada modelo y que es distinta de la observada. De hecho, las integraciones a escala estacional deben ser siempre corregidas por esta deriva de los modelos hacia su propia climatología. Una predicción estacional viene, por tanto, determinada por el conjunto de simulaciones que constituyen un *ensemble* (y que permiten hacer una predicción probabilística) y un conjunto de retro-predicciones (*hindcast*) suficientemente largo (al menos 20 - 30 años) para determinar la climatología del modelo. Las predicciones estacionales con frecuencia se expresan en forma de anomalías referidas a la propia climatología del modelo con el que se han realizado. Cuando se precise disponer de valores absolutos, y no de anomalías, para las predicciones estacionales éstas deben ser corregidas por sesgos y/o calibradas con la ayuda de observaciones.

En consecuencia, un sistema dinámico operativo típico de predicción estacional se basa en un conjunto (*ensemble*) de simulaciones realizadas con un único modelo que se inician a partir de unas condiciones iniciales que muestrean las condiciones observadas y que permiten realizar una predicción probabilística. Esta predicción basada en un *ensemble* debe siempre acompañarse de un conjunto de retro-predicciones (*hindcast* en la literatura sajona) también de alcance estacional -que con los medios de cálculo

actualmente disponibles suelen abarcar al menos 20 años- basadas también en ensembles que permiten definir -al menos aproximadamente- la climatología del modelo.

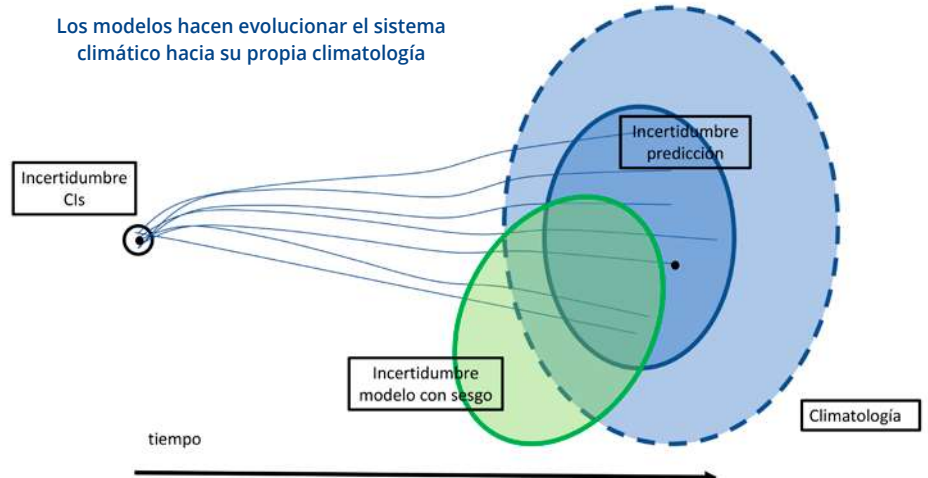
Actualmente coexisten diferentes estrategias para muestrear las condiciones observadas y generar un *ensemble* de simulaciones con un único modelo. Una estrategia consiste en generar un conjunto pequeño (por ejemplo, de 4 miembros) todos los días y -para inflar el tamaño del conjunto- combinar todos los pronósticos producidos durante una ventana de varios días. De esta forma los diferentes miembros del *ensemble* poseen diferentes alcances ya que muestrean las condiciones iniciales en una cierta ventana temporal (*lagged ensemble*) Otra estrategia consiste por el contrario en generar un conjunto grande de miembros correspon-

dientes a un mismo instante del sistema climático (*burst ensemble*). Existen también estrategias híbridas que combinan las dos anteriores. Ambas estrategias tienen ventajas e inconvenientes y no está claro cuál es la óptima aunque deben siempre tenerse en cuenta a la hora de interpretar las predicciones.

Finalmente, debe indicarse que los diferentes sistemas de predicción estacional basados en un modelo dinámico pueden a su vez combinarse para generar un *ensemble* multi-modelo que generalmente posee una mayor pericia que los sistemas basados en un único modelo dinámico.

4 La OMM y los RCOF

El episodio de El Niño de 1997/1998, el más fuerte del siglo XX, proporcionó una muestra de los efectos de las variaciones climáticas en el plazo estacional y del valor potencial de su previsión. Este episodio también coincidió con el éxito de la campaña de observaciones oceánicas a lo largo del Pacífico ecuatorial y el desarrollo de varios modelos de predicción oceánica utilizando estos datos oceánicos. Poco antes de este episodio (1996) se habían establecido por la OMM los Foros Regionales de Perspectivas Climáticas (RCOF, por sus siglas en inglés). Estos foros tienen carácter operativo y reúnen, bien presencial o virtualmente, a expertos -nacionales, regionales e internacionales- en materia de clima, para analizar y evaluar la información climática disponible a escala estacional y finalmente elaborar la predicción estacional mediante consenso de todos los participantes. Los RCOF reúnen a países con características clima-



tológicas comunes para garantizar coherencia en el acceso y la interpretación de la información climática. También a través de la interacción con los usuarios de sectores económicos clave de cada región y con responsables políticos, los RCOF evalúan las posibles implicaciones de las predicciones estacionales en los sectores socioeconómicos más relevantes de la región que abarca cada RCOF. El foro para la región mediterránea (MedCOF) que abarca 34 países está coordinado desde su creación en 2013 por AEMET (<http://medcof.aemet.es>). A su vez MedCOF incluye y coordina dos RCOF subregionales: uno que abarca principalmente la región SE de Europa (SEECOF) y otro que engloba a los países mediterráneos del norte de África (PRESANORD).

El procedimiento actual seguido en las sesiones de MedCOF -y de la mayoría de los RCOF existentes- para generar predicciones estacionales se basa en el análisis de la información disponible por parte de los expertos participantes, en su discusión y finalmente en la elaboración de una predicción estacional consensuada en forma de producto gráfico para la región. Este procedimiento se basa principalmente en el análisis de las fuentes de predecibilidad: i) análisis de las condiciones oceánicas actuales y de su evolución estimada por distintos sistemas de predicción disponibles; ii) análisis de impulsores a escala estacional (patrones de variabilidad y su evolución, memoria asociada a subsistemas y variables de evolución lenta, forzamientos externos (p.ej., grandes erupciones volcánicas)); iii) análisis de la circulación atmosférica actual y su evolución estimada por los distintos sistemas de predicción; iv) predicción de los parámetros climáticos (temperatura y precipitación) en función de la evolución más probable de la circulación atmosférica; v) resumen y mapas de síntesis. Este procedimiento eminentemente subjetivo presenta varios inconvenientes que han sido ampliamente identificados. El proceso de predicción no es rastreable ni reproducible (las previsiones realizadas en temporadas anteriores no pueden ser reproducidas por un grupo

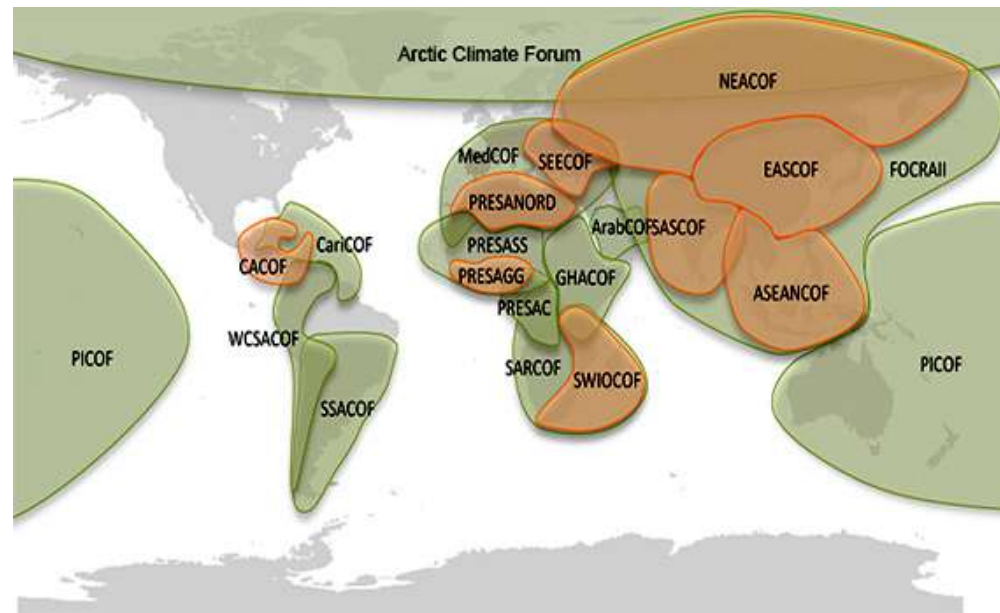
de predicción diferente). Las predicciones no están disponibles en forma digitalizada y, por tanto, apenas pueden utilizarse para el desarrollo posterior de servicios basados en predicciones estacionales. Esta última limitación representa un grave obstáculo para su uso. Además, la generación de productos gráficos -y no numéricos- para las predicciones probabilísticas estacionales impide la verificación de las predicciones utilizando procedimientos e índices de verificación estandarizados.

Típicamente, por tanto, un RCOF analiza los impulsores del clima y la evolución estimada de la circulación atmosférica y de los principales parámetros climáticos proporcionada por los distintos sistemas de predicción disponibles. Es-

nes probabilísticas (basadas en terciles) de precipitación de los 8 modelos que integran el sistema C3S de predicción estacional y su combinación con ponderación equiprobable. Este ejemplo muestra una gran similitud entre las diferentes predicciones que no se suele dar habitualmente y que hace mucho más compleja su combinación en forma de una única predicción estacional.

El producto final de una predicción por consenso generada en el marco de los RCOF en la que se combina toda la información disponible son figuras como las que se muestran más abajo para el caso de MedCOF.

Tras 20 años de predicciones estacionales operativas basadas en un pro-



Los RCOF actualmente existentes. Fuente: OMM

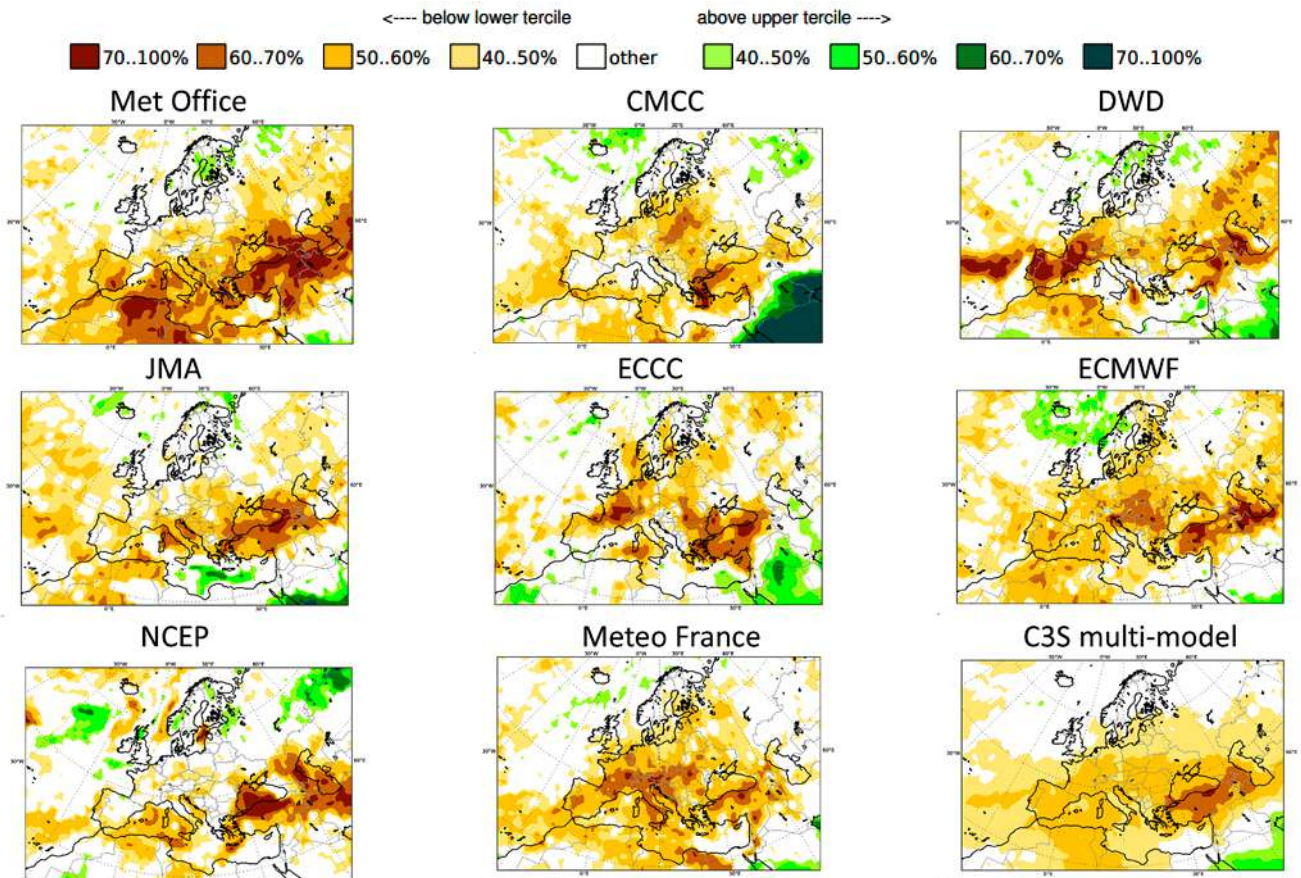
ta evolución para regiones y estaciones con poca predecibilidad suele mostrar gran disparidad entre los diferentes sistemas de predicción. Consiguientemente, durante las sesiones de los RCOF, los expertos se encuentran ante el dilema de combinar las diferentes fuentes de información de forma ponderada -o no en función de diferentes criterios, como por ejemplo la diferente pericia de los sistemas. Actualmente, este pesado o ponderación para combinar la información procedente de los diferentes sistemas o bien se hace de forma subjetiva o bien directamente se asigna de forma automática un igual peso para todos los sistemas de predicción. La figura adjunta muestra el conjunto de prediccio-

cedimiento de consenso, la OMM está actualmente impulsando una transición a procedimientos objetivos que generen adicionalmente datos numéricos utilizables para su posterior aplicación en servicios climáticos basados en las predicciones estacionales. El grado de subjetividad que hay actualmente en todo el proceso durante el análisis de los forzadores climáticos, de las estimaciones de cada sistema dinámico y/o empírico de predicción estacional y su combinación final mediante un procedimiento basado en el consenso es lo que se pretende sustituir por un sistema objetivo y automatizable. Los elementos y procedimientos de esta transición serán objeto de una segunda parte de esta contribución.

Predicción estacional: evolución y nuevas perspectivas (I)

Probabilidad del tercil más probable de precipitación

(JJA 2022, CI nominales 01/05/2022)



Predicciones del tercil más probable de precipitación para junio-julio-agosto de 2022 basadas en los 8 sistemas operativos de predicción estacional integrados en C3S y su combinación (en esquina inferior derecha). Fuente: https://climate.copernicus.eu/charts/c3s_seasonal

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la OMM y a todo el equipo que participa en el Foro Mediterráneo de Perspectivas Climáticas (MedCOF) tanto por el trabajo conjunto operativo como metodológico a lo largo de los últimos diez años que ha permitido progresar en el desarrollo de la predicción operativa sobre la región mediterránea. Agradecimiento extensivo a todos los participantes en el proyecto ERA4CS MEDSCOPE dedicado a

mejorar el conocimiento sobre la predictibilidad a escala estacional sobre el Mediterráneo, a generar herramientas de pos-proceso para predicciones estacionales y a desarrollar y evaluar servicios climáticos sobre la misma región.

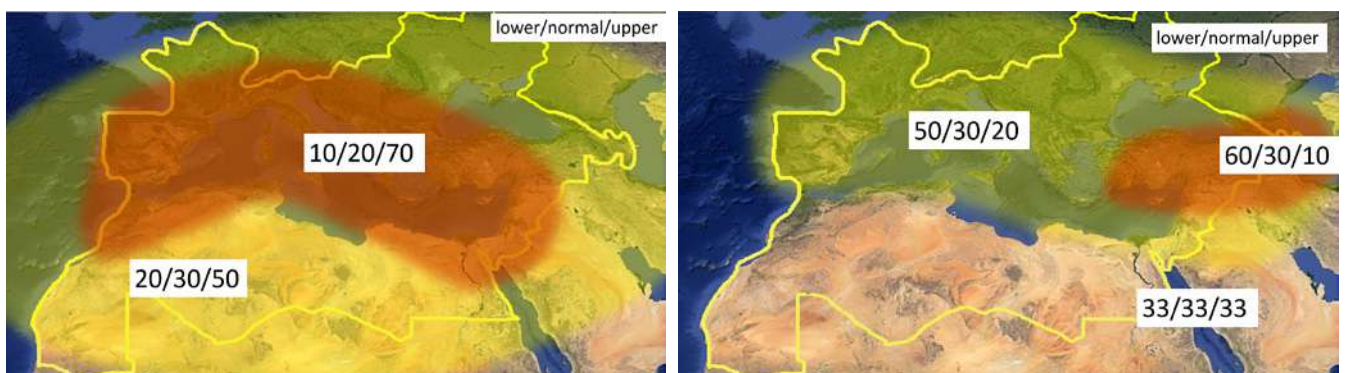
Referencias y lecturas adicionales

● WMO, 2015: Seamless Prediction of the Earth System: From Minutes to Months. WMO

No. 1156. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3546

● WMO, 2020: Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting. WMO-No. 1246. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10314

● Rodríguez Camino, E., Rodríguez Guisado, E., Sánchez García, E., Franco Manzano, F., Pastor Saavedra, M.A., 2018: Iniciativa MedCOF de predicción estacional consensuada. 6º Simposio Nacional de Predicción, AEMET, <https://dx.doi.org/10.31978/639-19-010-0.641>



Ejemplo de predicción estacional por consenso de temperatura (izquierda) y de precipitación (derecha) basada en terciles para el verano (JJA) de 2022 realizada por MedCOF. Fuente: <http://medcof.aemet.es/>